

Sous la direction de Michel Colombié
Jean-Pierre Cordebois et coll.



FABRICATION PAR USINAGE

2^e édition

DUNOD

Photo de couverture : © Maurizio Targhetta – Fotolia.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
	

Nouvelle présentation 2013
© Dunod, Paris, 2003, 2008
ISBN 978-2-10-059861-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	V
Liste des collaborateurs	VII
1 • La production mécanique	1
1.1 Place de la production dans le cycle de vie du produit	1
1.2 Intégration produit-processus	13
2 • Le prototypage rapide	25
2.1 Introduction	25
2.2 Qu'est-ce qu'un prototype ?	28
2.3 Moyens conventionnels de prototypage	29
2.4 Procédés de distribution de matière ou prototypage rapide	33
2.5 Duplication de pièces	43
2.6 Conclusions	48
3 • La mise en œuvre des bruts	49
3.1 Techniques de moulage	49
3.2 Techniques de forge	81
3.3 Emboutissage des métaux	95
3.4 Techniques de soudage	106
4 • CAO et FAO	137
4.1 Introduction et concepts	137
4.2 Génération de trajectoires, concept de base	143
4.3 Modélisation des surfaces complexes	147
4.4 Stratégies et techniques d'usinage	167
5 • La coupe des matériaux	181
5.1 Formation des copeaux	181
5.2 Modélisation de la coupe	189
5.3 Maîtrise et prédétermination des états de surface	216

5.4	Contraintes résiduelles dans les surfaces usinées	227
5.5	Usinabilité des matériaux	234
6 •	Les outils de coupe et leur mise en œuvre	247
6.1	Description des matériaux de coupe	247
6.2	Géométrie des outils de coupe	270
6.3	Fluides de coupe	273
6.4	Usure des outils	282
6.5	Maîtrise des copeaux en production	299
6.6	Prédétermination et maîtrise des opérations d'usinage	304
7 •	Les machines-outils	311
7.1	Cellule élémentaire d'usinage	311
7.2	Modélisation de la machine	320
7.3	Mise en œuvre	330
8 •	La préparation du travail	349
8.1	Introduction	349
8.2	Concept d'entité	353
8.3	Conception logique de la gamme	361
8.4	Procédures métier pour formaliser les processus d'usinage	393
8.5	Isostatisme	402
8.6	Validation d'une gamme par simulation : cotation de fabrication	413
8.7	Réglage d'une fabrication dans la cellule élémentaire d'usinage	432
9 •	Qualité et métrologie	443
9.1	Système de management de la qualité	443
9.2	Maîtrise de la production	448
9.3	Spécification et vérification de la géométrie des produits	471
9.4	Contrôle des formes gauches	490
10 •	Techniques d'obtention spécifiques	505
10.1	Rectification	505
10.2	Tournage dur	517
10.3	Usinage par électroérosion	524
10.4	Usinage électrochimique	533
10.5	Découpage	542
	Bibliographie	571
	Index	579

AVANT-PROPOS

Ce livre est le fruit d'un travail collectif. Les différents auteurs enseignent au Conservatoire des Arts et Métiers dans la filière « Production automatisée », à Paris ou en province. En conséquence son contenu est fortement influencé par les programmes des enseignements dispensés dans cette formation.

Cet ouvrage n'a pas la prétention de faire un point exhaustif sur l'ensemble des problèmes relatifs à l'usinage, par contre, il aborde certains sujets qui nous ont paru opportuns. Certes ce ne sont pas les seuls, mais il a fallu se limiter et donc faire des choix.

Nous avons également tenu à aborder, souvent de façon rapide, des technologies qui ont une incidence sur les opérations d'usinage, ainsi des chapitres sont consacrés au soudage, à la fonderie, à la forge et à l'emboutissage. Des techniques complémentaires à l'usinage sont également évoquées.

Les publics concernés sont constitués de professionnels travaillant en entreprise dans les secteurs de la production des pièces mécaniques, d'enseignants et d'étudiants. Le niveau visé couvre les compétences du technicien et de l'ingénieur.

Comme tout ouvrage collectif, des problèmes d'articulation et d'harmonisation des contributions se sont posés. Ils ont été résolus au mieux ; si certains subsistent, ils ne devraient pas altérer la compréhension du propos.

Pour terminer je souhaite remercier tous les auteurs, qui ont été sollicités dans un contexte surchargé. Que Benoît Furet, Pierre François et Olivier De Smet trouvent ici l'expression de ma gratitude, pour le travail de relecture et le soutien informatique de l'entreprise.

Jean-Pierre Cordebois

LISTE DES COLLABORATEURS

- Michel Chambe, ENI de Saint-Étienne.
- Alain d’Acunto, ENSAM de Metz.
- Michel Dursapt, ENI de Saint-Étienne.
- Pierre François, CNAM Paris.
- Benoît Furet, IUT de Nantes.
- Jean-François Guénal, IUT de Limoges.
- Jean-Michel Le Meur, Rectorat de Créteil.
- Patrick Martin, ENSAM de Metz.
- Luc Mathieu, CNAM Paris.
- François Mollet, Lycée de Nogent-sur-Oise.
- Yves Pouzaint, IUT de Nantes.
- Joël Rech, ENI de Saint-Étienne.

1 • LA PRODUCTION MÉCANIQUE¹

1.1 Place de la production dans le cycle de vie du produit

1.1.1 Le système entreprise/fonction industrielle

■ Le contexte

L'entreprise constitue un système complexe dont les activités répondent à la fois à des objectifs techniques, économiques, humains, sociaux... Il est très difficile d'en avoir une image complète suivant le niveau d'analyse (global, local approfondi, à court terme ou prospectif...), le point de vue (management, financier, commercial, technique...), l'objectif recherché (analyse de flux, de l'organisation, de la structure...). Nous allons préciser les objectifs généraux, les contraintes, les différents aspects afin d'une part de situer les activités de conception et de fabrication et d'autre part d'identifier les connaissances, les informations, les traitements à mobiliser pour répondre aux objectifs de l'entreprise.

Nous nous plaçons dans le cadre de la production mécanique qui a pour fonction la réalisation d'ensembles mécaniques commercialisés comme les produits finis obtenus par transformation de produits bruts et répondant aux spécifications techniques et aux fonctions de service. Les systèmes mécaniques comportent un ensemble de pièces en trois dimensions dont certaines sont en mouvement les unes par rapport aux autres ou bien assemblées d'une façon permanente (soudage, collage, rivetage...) ou non (boulonnage...) et soumises à des efforts ou des contraintes. Les matériaux utilisés sont essentiellement métalliques, la mise en œuvre d'autres matériaux comme les matériaux plastique, les composites, les matériaux à base de bois... relèvent également de la même problématique. Une contrainte forte dans la réalisation de pièces mécaniques est la nécessité d'obtenir des pièces de haute qualité (dimensions, état de surface géométrique et technologique...) afin de répondre aux spécifications de tenue dans le temps et aux différentes sollicitations (efforts, température...), par des processus irréversibles sujets à aléas mettant en œuvre des procédés et des moyens de fabrication ayant une précision limitée et d'un coût élevé. Cette exigence de qualité, associée à la diminution des coûts comme des délais se place dans un processus d'amélioration permanente. Aussi est-il nécessaire d'avoir une connaissance à la fois suffisamment approfondie et synthétique de la fabrication mécanique afin de maîtriser la mise en œuvre de la

production dans un contexte de conception et de fabrication intégrées. Cette connaissance se formalise par des démarches, modèles, méthodes et outils dont les principaux sont présentés dans cet ouvrage.

■ Le système entreprise

Rappelons tout d'abord la définition d'un système afin de situer le contexte de la production mécanique, avant de préciser les types d'organisation et les différents flux qui traversent l'entreprise.

Un système est un objet qui, dans un environnement, doté de finalité, exerce une activité et voit sa structure interne évoluer au fil du temps, sans qu'il perde pourtant son identité unique (Le Moigne, 1994). Il est constitué de sous-systèmes possédant leurs fonctions ayant des objectifs partiels mais des corrélateurs entre eux. Chaque sous-système est caractérisé par des flux d'informations (achats, produits, valeur, quantité...) qu'il génère et qui permettent de prendre des décisions (piloter la production) à différents niveaux par un système de boucles de retour permettant d'assurer les objectifs globaux de l'entreprise.

Le système entreprise se caractérise par :

- les flux ;
- les paramètres ;
- la structure ;
- l'organisation ;
- les vues : physique, organisationnelle, logistique.

□ Les flux

La figure 1.1 basée sur un formalisme du type IDEFO (ou SADT) (IGL, 1989) permet de mettre en évidence les principaux sous systèmes qui caractérisent le système entreprise (Roboam, 1988), elle met en évidence les flux qui traversent l'entreprise. Les flux physiques (en gras) des pièces, de la matière première au produit fini, subissent des transformations (mise en forme, usinage, assemblage, traitement thermique...) qui leur apportent leur valeur ajoutée ; ils constituent les flux les plus voyants. Mais l'ensemble des actions est commandé par des flux de décisions (planification, ordres de fabrication, du très court terme au long terme) prises à partir des données (commerciales, de production, stock, gammes, temps, personnels...) et ceci à différents niveaux. Bien évidemment les flux financiers (achat, ventes, rémunérations, impôts...) constituent un flux sous-jacent permanent.

□ Les paramètres

Les paramètres définissent les critères principaux permettant d'identifier et de classer les entreprises :

- activités : extraction, agriculture, production, distribution, service ;
- produits : matières premières, produits industriels, produits de consommation, biens d'équipement ;

- production : grandes séries, petites et moyennes séries, process, sur devis ;
- personnel : haut niveau, très qualifié, peu qualifié ;
- investissements : très lourds, importants, légers, quasi nuls ;
- recherche et développement : innovation, mode, moyen, nul ;
- clientèle : grand public, industriels, administrations, artisans, agriculteurs, distribution directe, détaillants, grossistes, dépôts, concessionnaires, grande distribution, par correspondance ;
- structure industrielle : usine unique, plusieurs usines nationales, plusieurs usines internationales.

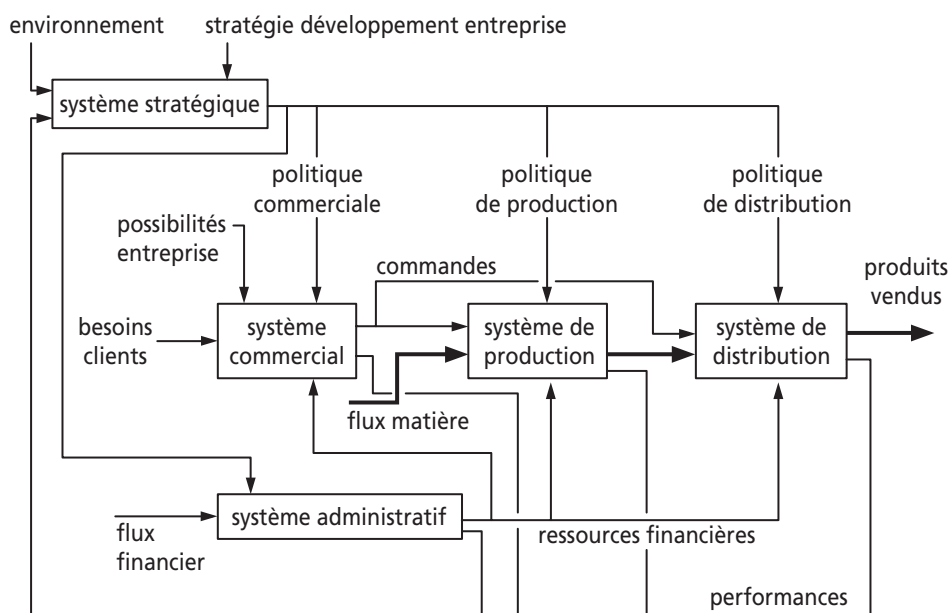


Figure 1.1 – Le système entreprise.

□ L'organisation

La structure de l'entreprise est définie par son organigramme, lequel dépend de la taille de l'entreprise, du type de produits fabriqués, de son historique. Dans les grandes entreprises, les fonctions sont mieux définies, alors que dans les PMI, plusieurs fonctions peuvent être assurées par la même personne. L'évolution technologique, la réponse rapide au marché, la mondialisation des échanges conduisent à de nouvelles structures, l'organisation matricielle couplant les fonctions techniques au niveau d'un même produit. L'organisation en plateau projet, le concept d'entreprise étendue associant plus étroitement donneur d'ordre et co-traitant sont autant de systèmes organisationnels apparus ces dernières années.

□ Le sous-système production

On peut trouver différentes définitions concernant l'activité production, l'évolution en terme d'intégration conduit à lui donner un sens large (Pourcel, 1986). La direction de la production exerce des fonctions techniques, économiques et humaines en assurant les activités suivantes :

- concevoir : recherche, développement, dimensionnement, industrialisation ;
- approvisionner : acheter, transporter, emmagasiner ;
- fabriquer : préparer, transformer, assembler, transférer ;
- piloter : gérer, planifier, contrôler (qualité, suivi de production), exploiter (maintenir, former).

Ces activités sont liées, ce qui en fait la richesse mais aussi la complexité. Le sous-système production comprend des services opérationnels et des services fonctionnels.

Les services opérationnels

- Fabrication : sa mission est de fabriquer dans les conditions de quantité, qualité, délais, les produits suivant les ordres de fabrication élaborés par le service lancement ordonnancement.
- Réception-expédition.
- Outillage.
- Maintenance.
- Manutention.

Les services fonctionnels

- L'approvisionnement a pour but de pourvoir l'entreprise de l'ensemble des fournitures et des services nécessaires à la réalisation de ses activités dans les quantités, qualité, délais nécessaires aux meilleures conditions de prix.
- La fonction études effectue à partir des spécifications client l'étude de faisabilité, les notices de calculs, l'estimation des coûts, les nomenclatures, les dessins de définition.
- La fonction méthodes (ou industrialisation) est chargée de la préparation technique du travail, c'est-à-dire de définir les moyens nécessaires pour la réalisation optimale du produit. À court terme, il s'agit d'élaborer le dossier de fabrication : gamme de fabrication, choix des machines, définition des montages d'usines et des outils, dessins de fabrication, à partir des dessins de définition des pièces à réaliser, des quantités à réaliser et connaissant les capacités et capabilité des équipements, des possibilités de sous-traitance. À moyen terme, il s'agit d'élaborer les devis, d'améliorer les moyens de fabrication, d'étudier les postes de travail et les implantations des machines. À long terme, il s'agit de rechercher de nouveaux moyens de fabrication, de nouveaux procédés, de participer aux choix de nouveaux équipements.

- La fonction lancement-ordonnancement assure le pilotage de la production à moyen terme et à court terme à partir des besoins commerciaux (quantités, délais) et des disponibilités des ressources de production.

1.1.2 Place de la production dans le cycle de vie du produit

La nécessité de répondre à la fois aux directives législatives et économiques impose d'avoir une approche globale sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Il est nécessaire de prendre en compte dès la conception à la fois les contraintes (techniques, économiques, logistiques) définies par les fonctions de service, mais aussi celles de fabrication (usinage, moulage, mise en forme, assemblage...) comme de démantèlement. Le produit se place ainsi dans un cycle (figure 1.2) et les données associées doivent assurer la cohérence des informations, leur traçabilité, dans le cadre de la conception et fabrication intégrées.

1.1.3 Pilotage de la production

La gestion de la production a pour but la synchronisation de l'ensemble des actions de production agissant sur les flux de matière qui traversent l'entreprise, en tenant compte des contraintes et des critères de performance, à partir de ressources physiques, humaines et financières (Courtois, 1995).

■ Les ressources

- Physiques : machines, outillages, matériels de manutention, emplacements...
- Humaines : nombre, compétences...
- Financières : trésorerie, emprunts...

■ Les contraintes internes

- Techniques : performances et disponibilités des ressources, quantité d'informations, fiabilité, aléas...
- Organisationnelles : structures et objectifs des services.
- Financières.
- Humaines et sociologiques : horaires, ergonomie, sécurité...

■ Les contraintes externes

- Marché.
- Lois et règlements...

■ Les critères

Ils sont en général contradictoires :

- répondre à la demande en délai, en diversité des produits, en qualité ;
- minimiser les coûts ;
- assurer le maximum de productivité, de production ;

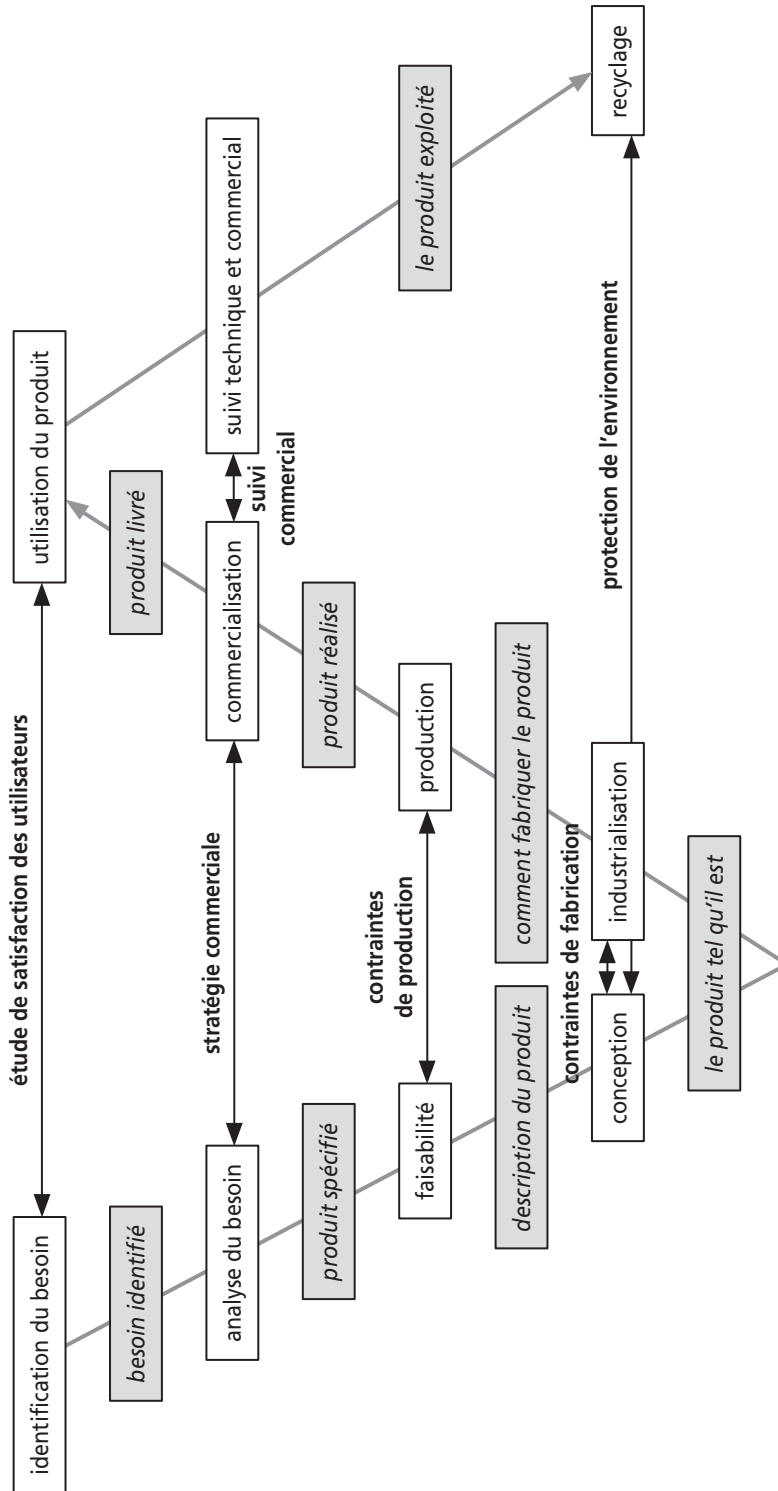


Figure 1.2 – Le cycle de vie du produit.

- diminuer les stocks et en-cours ;
- réduire le cycle de production.

1.1.4 Horizons de décision

Gérer c'est prévoir, il est donc important de bien avoir à l'esprit la notion d'horizon de décision, les actions associées et leurs objectifs. On distingue classiquement trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel auquel on peut ajouter le pilotage d'atelier à très court terme. Chaque niveau est défini par son horizon H de décision et par la période P d'affinement de celui-ci.

Le niveau stratégique ou à long terme ($H = 3$ à 5 ans, $P = 6$ mois à 1 an) établit le plan d'activité, c'est-à-dire le potentiel productif, sa localisation, les gros équipements, la diversification de l'activité de l'entreprise...

Le niveau tactique à moyen terme ($H = 4$ à 6 mois, $P = 2$ à 3 mois) établit le plan industriel et commercial, c'est-à-dire le programme de production sur les familles de produits, il formalise le cap que suivra l'entreprise dans les mois à venir et assure le lissage des charges globales. Pour effectuer ces traitements, il est nécessaire de disposer des macrogammes qui fournissent la charge globale nécessaire par centre de charge pour identifier les postes goulets, les matières premières et articles stratégiques.

Le niveau opérationnel à court terme ($H = 3$ jours à 1 mois, $P = 1$ jour à 1 semaine) établit le plan directeur de production, c'est-à-dire les approvisionnements, les besoins en matières et composants, la répartition des charges. Il assure la traduction du programme de production (ventes et estimations commerciales) en un plan exprimé par un échéancier de produits à fabriquer en s'appuyant sur les gammes opératoires. Celles-ci fournissent, à partir des gammes de fabrication, les éléments indispensables à l'établissement du plan directeur de production ; il s'agit de la liste ordonnée des postes nécessaires, les ressources nécessaires et les temps (préparation, manutention, fabrication) prévus. Afin de pouvoir assurer l'adaptation de la production à ses objectifs en temps réel et aux disponibilités des moyens de production, la fonction méthodes devra fournir des variantes de gammes. En effet l'établissement des gammes peut se faire plusieurs mois avant la réalisation des pièces sans que l'on connaisse la disponibilité des équipements ou la taille de la série.

Le niveau opérationnel à très court terme ($H = 1$ jour à 1 semaine, P en temps réel) assure la gestion d'atelier en temps réel (répartition des charges, des personnels) en s'appuyant sur le planning d'atelier ou la simulation connaissant les gammes de fabrication exactes et les capacités des moyens de production.

1.1.5 Typologies de production

Compte tenu des typologies de production, des produits à fabriquer, des horizons de décision, on trouvera différentes méthodes de gestion et la précision des décisions (durée allouée, poste de charge...). On distingue classiquement les typologies suivantes (Pourcel, 1986).

■ Les typologies de production suivant la vue répétitivité

□ Fabrication continue (*process shop*)

Elle traite des quantités importantes de produits peu différenciés, utilise des lignes de production constituées de machines à vocation particulière ; les produits circulent très vite grâce à des systèmes de manutention automatiques (tuyaux, pompes, convoyeurs...). On produit sur stocks établis de manière prévisionnelle, il y a peu d'ordres de fabrication et les stocks d'en-cours sont très faibles. L'objectif est d'équilibrer au maximum les postes d'une part et d'éviter tout arrêt imprévu de l'installation (entretien préventif). Les opérateurs sont peu qualifiés et assurent la surveillance. La phase étude, conception de l'installation, choix du process est très longue et importante. L'industrie agroalimentaire ou chimique correspond à ce type de production.

□ Fabrication linéaire en grande série (*flow shop*)

On fabrique en grande série des pièces appartenant à une même famille sur un ensemble de machines dédiées reliées par un système de manutention automatique. La production se fait sur stock avec un stock important de matière première et peu d'en-cours. Les caractéristiques de ce type de production sont comparables au *process shop*, la conception du produit, comme des moyens de production, est longue et coûteuse afin d'assurer l'optimisation des flux et des conditions opératoires, la réduction des temps et des coûts de production. La fabrication automobile ou de biens d'équipement se situe dans cette catégorie.

□ Production discontinue (*job shop*)

Il s'agit d'ateliers à vocation polyvalente disposant de machines à commande numérique (centres d'usinage, tours...) et de machines conventionnelles. Les charges des différents postes ne sont pas équilibrées et les en-cours restent nombreux ; on a une surcapacité de production pour les machines courantes et quelques postes goulets d'étranglement. Les ateliers comportent des machines-outils conventionnelles et de plus en plus de machines à commande numérique. Les ordres de fabrication sont très nombreux, l'objectif est d'assurer les délais et le plein emploi des personnels (gestion par la charge). Ceux-ci sont polyvalents et assurent une partie de la préparation du travail. L'activité de sous-traitance ou de réalisation de prototype se classe dans cette catégorie. La réduction des délais de fabrication peut se réaliser par une automatisation des manutentions (chargement-déchargement en temps masqué sur les machines équipées d'une double palette, robot de chargement, îlots automatisés de fabrication pouvant travailler de nuit sans opérateur) d'une part, d'autre part par une réduction des temps de fabrication (usinage grande vitesse). Ce type de fabrication correspond aux petites et moyennes séries, souvent de sous-traitance. L'entreprise travaille sur cahier des charges ou spécifications définies par le client.

Dans certains cas, ces ateliers peuvent être dédiés aux pièces unitaires (maintenance, prototype, pièces spécifiques...) ou de très petites séries. Des équipements spécifiques de prototypage rapide permettent la réalisation de pièces de présentation en trois dimensions, des outillages de présérie, des pièces d'essais par des procédés nouveaux permettant d'obtenir des formes très rapidement par rapport aux moyens

d'usinage conventionnels. L'entreprise est maîtresse de son savoir-faire et de sa capacité de production, les ouvriers sont très qualifiés.

□ Fabrication à la commande (*job order*) ou par projet

Il s'agit de grands projets : grands travaux, construction navale... L'entreprise a été choisie pour son savoir-faire et sa capacité de production, les personnels sont très qualifiés, la manutention est importante. La gestion devra maîtriser les délais d'étude et de réalisation, les coûts de réalisation ; elle s'appuiera sur les méthodes de gestion de projet et l'utilisation de la méthode PERT.

■ Les typologies de production suivant la vue produit/process

On définit les configurations de base : divergente (débit), linéaire (transformation de pièces), convergente (assemblage de pièces pour réaliser des sous-ensembles et des produits). Il existe également des combinaisons possibles de ces configurations.

■ Les typologies de production (AFGI)

L'Association française de gestion industrielle (AFGI) a proposé (figure 1.3) un regroupement des points de vue précédents auquel sont ajoutées la réponse à la commande et la nature de la valeur ajoutée définissant ainsi différents types de production pour lesquels les méthodes utilisées, ou les données utiles, doivent être dédiées pour assurer le pilotage.

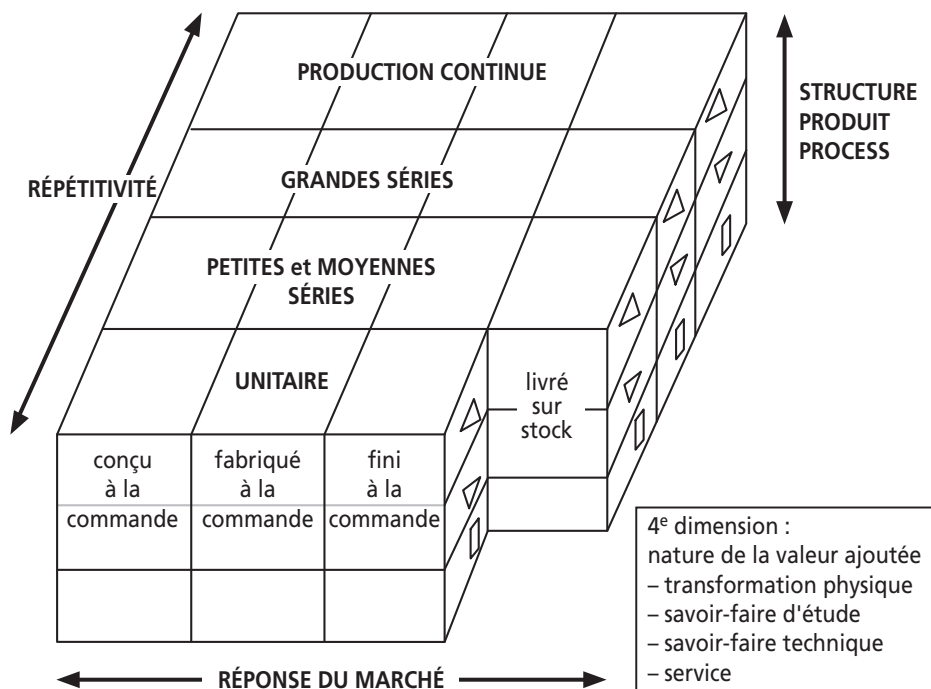


Figure 1.3 – Les typologies de production (AFGI).

1.1.6 Les aspects économiques

■ Notion de série économique

Ce calcul théorique permet d'appréhender cette notion ; par contre l'utilisation de la formule de Wilson devra se faire avec précaution et souvent être interprétée au cas par cas.

Il s'agit de déterminer la quantité Q^* optimale à lancer qui assure le meilleur compromis entre le coût de lancement C_l (€/s) d'une série correspondant à la préparation de la machine et à la prise de connaissance du dossier de fabrication d'une part et le coût de possession d'un article fabriqué C_p (€/a/p) pendant une période p (1 an par exemple), somme du coût de stockage et du coût de dépréciation. On suppose que la consommation est une fonction linéaire du temps et que la période de fabrication de la série de pièces est constante (figure 1.4a).

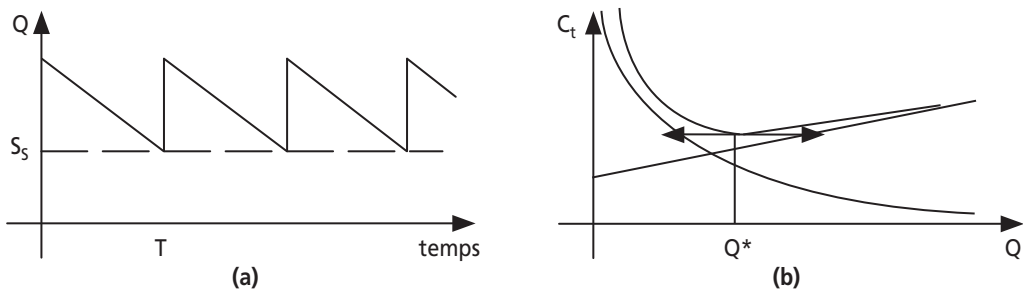


Figure 1.4 – Série économique.

(a) Évolution de la quantité en stock en fonction du temps. (b) Quantité optimale.

Le coût total C_t de fabrication pendant la période considérée (1 an par exemple) est la somme du coût de lancement d'un lot, du coût de possession et du coût de fabrication.

Soit D la demande pendant la période p considérée, Q la quantité à lancer à chaque lot (le nombre de lots par période est donc D/Q), S_s le stock de sécurité : le stock moyen vaut donc $S_s + Q/2$.

La dérivation par rapport à Q permet de calculer le lot économique Q^* (figure 1.4b) et le nombre de commandes N^* pour la période (formule de Wilson) :

$$Q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot C_l \cdot D}{C_p}} \quad \text{et} \quad N^* = \frac{D}{Q^*} = \sqrt{\frac{C_p \cdot D}{2 \cdot C_l}} \quad (1.1)$$

Remarque

Le minimum de la courbe est relativement plat ; si Q varie de 20 % autour de Q^* , le coût total C_t ne varie que de 5 % environ. La quantité à lancer varie comme la racine carrée du besoin annuel, donc si celui-ci varie de 50 % la quantité à lancer ne sera augmentée que de 22 %. Ce modèle correspond à une production stabilisée ; d'autre part la formule est mise en défaut dès lors que les lots passent sur différentes machines pour lesquelles Q^* n'est pas identique, ou bien lors de l'assemblage le nombre de sous-ensembles devra être identique afin d'éviter d'avoir des pièces restantes ; il sera donc nécessaire d'avoir un raisonnement global.

■ Coût de fabrication et choix des conditions opératoires

La précision dans le choix des conditions opératoires, donc les temps que l'on alloue pour cette détermination, dépend des gains de temps espérés, des gains de productivité en grande série ou des risques pris.

Par exemple, calculons le coût d'usinage d'une longueur L en tournage avec un coût de changement d'outil et un coût de pénalité C_p associé à la probabilité P de bris prématuré d'outil (Martin, 1980) :

$$C_u = C_h \cdot t_u + C_s \cdot T/t_u + C_p \cdot P \quad (1.2)$$

avec :

- C_u le coût total de l'usinage ;
- C_h le coût d'utilisation de la machine par unité de temps ;
- C_s le coût de changement d'un outil ;
- T la durée de vie moyenne de l'outil : $V \cdot T^n = \text{constante}$;
- t_u le temps d'usinage : $t_u = \pi \cdot D \cdot L / V \cdot v_f$;
- V la vitesse de coupe et V^* la vitesse de coupe optimale sans pénalité :
 $V^* = C(C_h \cdot n / (C_s(1 - n)))^n$;
- T/t_u le nombre de changements d'outils ;
- P la probabilité de bris d'outil,

la loi de distribution de la durée de vie par rapport à la valeur moyenne est considérée comme normale (d'écart type σ) dans le système de coordonnées $x = \log V$, $y = \log T$:

$$VT^n = C\sigma^{n\alpha} \quad \text{et} \quad P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-u^2/2} du \quad (1.3)$$

Lorsque C_p augmente, les courbes $C_u(V/V^*)$, paramétrées en C_p , passent par un minimum (figure 1.5) qui correspond à une vitesse de coupe \bar{V} de plus en plus faible, et sont de moins en moins évasées. Ainsi plus le risque est grand, plus la vitesse de coupe devra être faible et choisie avec précision.

■ Estimation du temps indirect optimal

Le temps de préparation ou le temps mis pour établir un devis peut être plus ou moins long suivant la difficulté de fabrication, la connaissance que l'on a du processus de fabrication, la taille de la série et le gain de coût (de temps) espéré. Aussi aura-t-on toujours un compromis entre le coût indirect de préparation qui se répartit sur la quantité produite et le gain financier. Illustrons par un exemple ce compromis entre le gain de production espéré et le coût nécessaire à l'obtention de ces meilleures conditions, en déterminant le temps (lié directement au coût) indirect optimal (Halevi, 1995).

Soit T_i , le temps indirect = $T_{if} + T_{iv}$. Dans cette relation T_{if} est fixe, c'est le temps passé pour élaborer un premier processus de fabrication, T_{iv} est variable, c'est le temps passé pour générer des alternatives et obtenir l'optimum.

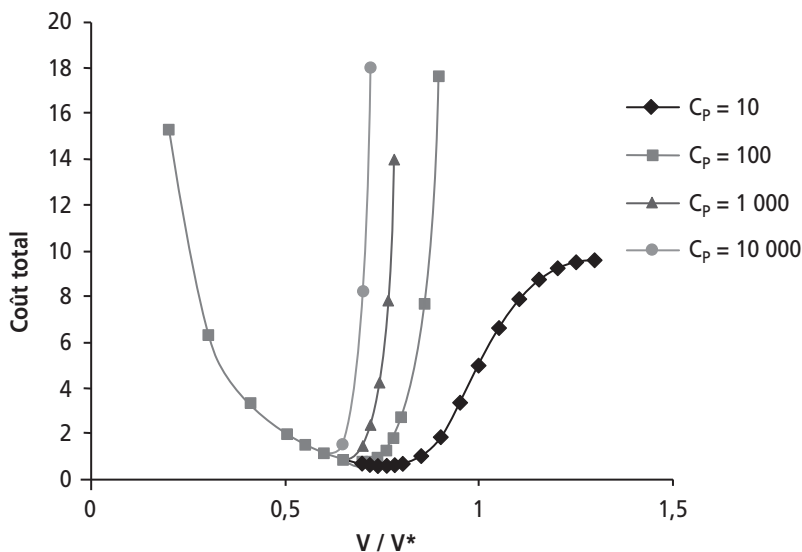


Figure 1.5 – Évolution du coût d'usinage
compte tenu d'un coût de pénalité pour bris d'outil prématuré.

T_d est le temps de fabrication direct, variant de $T_{d\max}$ à $T_{d\min}$ tel que :

$$T_d = T_{d\min} + T_{if}(T_{d\max} - T_{d\min})/T_i$$

Le coût total de préparation et de fabrication est donné par :

$$C = Q \cdot C_{hd} \cdot T_d + C_{hi} \cdot T_i + c_s \cdot T_s$$

avec T_s le temps de préparation, c_s le coût horaire de préparation du poste de travail, C_{hd} le coût horaire direct, C_{hi} le coût horaire indirect, Q la quantité fabriquée.

La dérivation du coût C par rapport à T_i donne :

$$T_i^2 = Q(T_{d\max} - T_{d\min})T_{if}\frac{C_{hd}}{C_{hi}}$$

Application numérique

Avec $C_{hd} = 40$ €/h et $C_{hi} = 20$ €/h, $Q = 100$ pièces, une première estimation en un temps $T_{if} = 3$ min donne $T_d = 1,1$ min, la durée d'usinage optimale $T_{d\min}$ vaut 0,42 min, donc le temps de réflexion économique T_{iv} est de 16,4 min.

1.2 Intégration produit-processus

1.2.1 Introduction

Aujourd'hui, l'objectif commun aux entreprises, « être compétitif en terme de coût, de réactivité et de qualité dans un contexte de diversification et de fluctuation du marché, de mondialisation, de compétitivité accrue », a conduit au développement du *concurrent engineering* (Sohlenius, 1992 ; Tollenaere, 1998) et à l'entreprise étendue, c'est-à-dire à une modification complète de la chaîne conception – industrialisation. Parmi les facteurs principaux influents on peut citer :

- la mondialisation du marché et des sites de production (e-business, e-manufacturing) ;
- les nouvelles relations client/fournisseur, l'augmentation du nombre de partenaires et le découplage des services ;
- la réduction de la taille des séries et des délais de conception comme de réalisation ;
- le coût d'un produit, engagé à 80 % au niveau de la conception ;
- le développement de la simulation numérique et de l'intégration des données et des informations (usine numérique) ;
- le développement de l'intégration des fonctions marketing, conception, fabrication, logistique, planification.

Dans ce cadre, au niveau des techniques de production mécanique, une réponse consiste dans la conception et la fabrication intégrées (ingénierie intégrée, concurrente, simultanée, ingénierie de processus, intégration produit-processus...). Par processus, nous entendons à la fois les procédés (forge, fonderie, emboutissage, usinage, assemblage, prototypage rapide...), les moyens de production (machines, outillages...), les conditions de mise en œuvre (mise et maintien en position, conditions opératoires...), l'ordonnancement des opérations et la structure de l'installation. Les contraintes de fabrication (procédé, capacité, formes réalisables, précision...) doivent être prises en compte, simultanément aux contraintes économiques (coûts...), logistiques (délais, réactivité, taille des séries...) ou législatives (recyclage, sécurité...), le plus tôt possible dans la conception des produits et des systèmes de production. Les sous-traitants devenus équipementiers, à partir des spécifications géométriques et technologiques définies par le client, sont amenés à concevoir la pièce en fonction de leurs compétences et ressources (système de production). Le concepteur a un rôle de définition fonctionnelle des constituants, de dimensionnement compte tenu des sollicitations subies par le produit. La définition détaillée des pièces est réalisée par le fabricant qui mobilise ses compétences et son expérience. L'augmentation de la qualité, la diminution des délais et des coûts conduisent à introduire de nouvelles technologies, par exemple l'usinage grande vitesse. Ainsi, la réduction du nombre de phases dans la fabrication d'un produit est un des nouveaux éléments à prendre en compte dans la conception du produit et du processus de fabrication.

Ainsi il est nécessaire de structurer, formaliser, représenter (données et traitements) les connaissances et contraintes en s'appuyant sur les données expérimentales (procédés et moyens) et sur les modèles représentatifs des conditions industrielles afin de réaliser une intégration cohérente des connaissances des différents métiers utilisant les modèles, méthodes et outils appropriés de façon à répondre aux objectifs d'optimisation de la production. Ce concept est illustré figure 1.6 (Martin, novembre 2002). Un des objectifs de cet ouvrage est de présenter ces connaissances de production mécanique (modèles, méthodes, outils) qui s'inscrivent dans ce contexte de la conception et fabrication intégrées. Nous allons illustrer par deux exemples cette intégration (§ 1.2.3 et § 1.2.4).

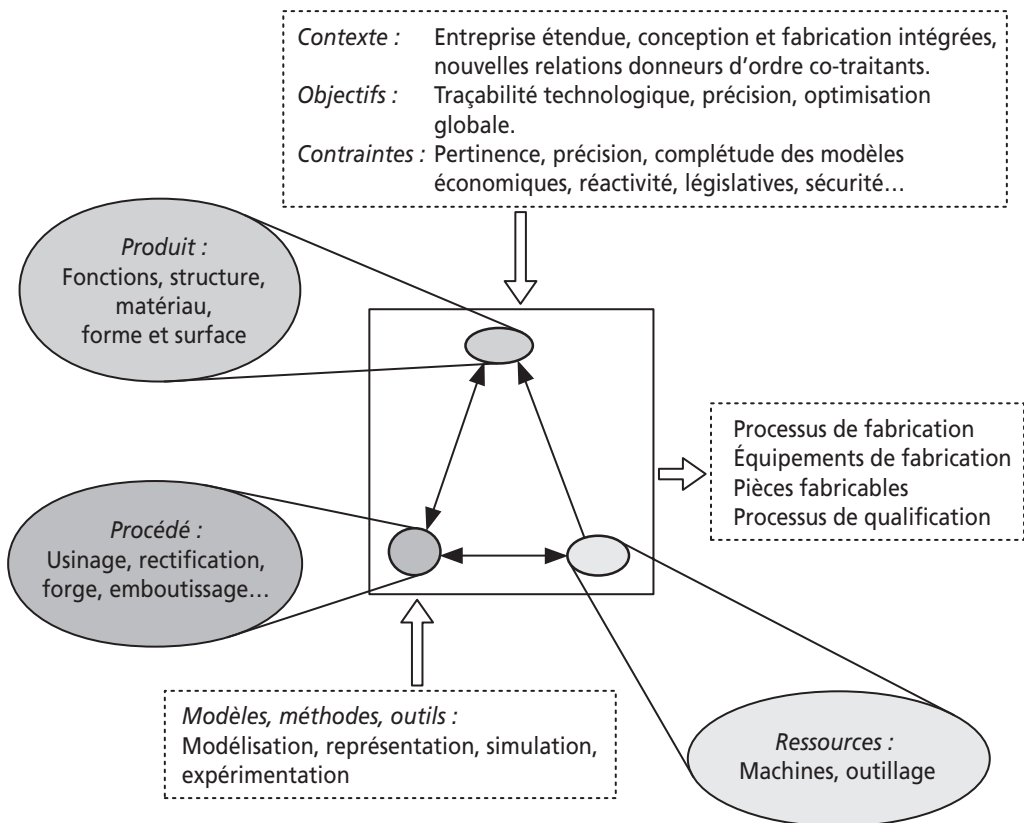


Figure 1.6 – Schéma de référence de la démarche d'intégration produit/processus.

1.2.2 Les différents états des modèles utilisés

Depuis les spécifications fonctionnelles jusqu'à la réalisation du produit, des modèles plus ou moins précis sont utilisés, liés aux hypothèses faites sur la prise en compte des contraintes de fabrication, aux performances des supports utilisés (logiciels, traitements, commande numérique...). Ceci est d'autant plus crucial que les sur-

faces sont complexes et que l'usinage est réalisé à grande vitesse (Duc, 2001). Ainsi une perte d'informations, associées aux connaissances sur les fonctions du produit ou sur les hypothèses relatives au procédé et au processus de fabrication, a lieu tout au long de la chaîne numérique. Cette perte est compensée par les utilisateurs qui doivent rester vigilants et posséder une bonne connaissance des performances et limites des outils utilisés ainsi qu'une vue globale de l'ensemble du processus de conception-fabrication. Les différents états du produit, les hypothèses ou les contraintes associées sont présentés dans le tableau 1.1, nous allons les illustrer par quelques exemples. Ce tableau permet de montrer la traçabilité technologique entre les différents modèles utilisés.

En usinage de formes complexes, la FAO a pour objectif d'élaborer le programme de commande numérique permettant de réaliser la surface à l'aide d'une fraise sphérique ou torique, à une précision donnée. Ceci nécessite, à partir du modèle géométrique CAO, le calcul du balayage de la surface qui respecte un pas longitudinal et un pas transversal donnés, déterminés par une position tangente de l'outil sur la surface. Les programmes de commande numérique générés sont souvent constitués d'une suite de petits segments de droite réalisés par interpolation linéaire. Afin d'éviter certaines sollicitations sur la chaîne cinématique, le directeur de commande numérique limite les accélérations. Ainsi toute transformation mathématique liée au découpage des fonctionnalités de chaque support introduit des erreurs. On peut, pour certaines surfaces (Bauchat, 1999), générer directement la trajectoire du centre de l'outil en interpolation circulaire. Il est donc nécessaire, en particulier en usinage grande vitesse, de construire directement la trajectoire qui respecte les contraintes fonctionnelles afin d'obtenir de meilleures précisions (Duc, 2001).

Le contrôle final de la pièce se fait par comparaison avec un modèle géométrique intermédiaire théorique dans lequel la fonction de la pièce a déjà été interprétée en général pour faciliter la lecture ou la mesure compte tenu des moyens disponibles à un certain moment (moyens de mesure, algorithmes de calcul). Ceci conduit à une augmentation du temps de réalisation et de contrôle, et une augmentation du nombre de pièces rebutées. Ainsi on a pu montrer que la procédure de contrôle des pignons (choix des points mesurés et algorithmes de traitement) peut être améliorée en cherchant à mieux s'approcher de leur fonctionnalité (cinématique ou géométrique) (Baudouin, 2001).

1.2.3 Conception d'un système de fabrication dédié à la grande série

Nous nous intéressons ici au développement d'un système de fabrication (Martin, octobre 2001), qui constitue un produit particulier, mais unique. Ce système devra permettre de fabriquer des produits en grande série appartenant à une même famille et devra pouvoir évoluer en fonction de l'évolution technologique ou de la demande du marché. Ainsi la conception du système de production est directement liée à la conception du produit. L'architecture retenue devra répondre (figure 1.7) aux exigences à la fois technologiques, économiques et logistiques, dans une approche cohérente s'appuyant sur une méthodologie, des modèles et des outils. Les différentes phases de la démarche et les outils ou les méthodes associés sont présentées tableau 1.2.

Tableau 1.1 – Les différents états des modèles utilisés en fabrication mécanique.

États du produit	Actions	Résultats des actions	Limitations
Données initiales « client »	Définir le produit	Fonctions – Spécifications Schémas de principe Nuage de points	Imprécision, incertitude, données incomplètes
Modèle géométrique	Représenter le produit	Modèle géométrique CAO	Modèleur CAO, représentation utilisée Arbre de construction Hypothèses sur le procédé de fabrication Vue fonctionnelle du produit
Modèle technologique	Choix des caractéristiques technologiques	Données technologiques des caractéristiques du produit	Utilisation de bases de données technologiques Expertise
Modèle éléments finis	Calcul de dimensionnement du produit	Modèle CAO éléments finis	Modèle éléments finis Lois de comportement utilisées
Modèle FAO pièce	Passage du modèle CAO au modèle FAO pièce	Modèle FAO de la pièce	Modélisation liée à un procédé d'obtention (usinage, forge, fonderie, injection...) Procédures de calcul de trajectoire Modèle facetisé
Modèle FAO outillage	Passage du modèle CAO au modèle FAO outillage	Modèle FAO de l'outillage	Passage de la pièce à l'outillage Procédures de calcul de trajectoire Modèle facetisé
Modèle technologique opérateur	Choix des conditions opératoires et du processus de fabrication	Données technologiques des conditions opératoires	Modélisation de l'interaction pièce/outil/machine Données expérimentales Expertise

États du produit	Actions	Résultats des actions	Limitations
Modèle « commande numérique »	Réalisation du programme commande numérique	Programme commande numérique	Procédures de calcul des trajectoires Fonctions d'interpolation Type de machine (3 ou 5 axes)
Modèle « asservissement »	Pilotage des mouvements des machines	Partie commande	Performances des interpolateurs et de la partie commande
Produit physique	Réalisation de l'outillage	Pièce outillage	Précision de fabrication Capabilité des moyens de production
Produit physique	Réalisation du produit	Pièce finie	Précision de fabrication liée au procédé Capabilité des moyens de production
Produit qualifié	Contrôle (dimension, qualité) du produit Comparaison avec les spécifications	Données du produit qualifié	Procédure de palpage Capabilité des moyens de contrôle Algorithmes de traitement Modèles de spécification géométrique ou technologique

Tableau 1.2 – Démarche de conception d'un système de fabrication.

Composantes de la démarche	Outils et méthodes
Phase 1 : Analyser la pièce	
Définir le posage de la pièce (pensé au moment de la conception)	Dessin de définition Identification de la surface d'appui
Analyse des tolérances	Mettre la pièce en position isostatique
Analyse des contraintes de productivité	
Phase 2 : Identifier les entités d'usinage	
Identifier les types d'entités	Expertise
Décrire les relations géométriques	Analyse des caractéristiques intrinsèques de l'entité
Définir les relations topologiques	Connaissance des 7 grandes relations
Localiser les entités	Matrices en coordonnées homogènes
Définir les listes ou les séquences	Relations d'antériorités ou de simultanéité définies par logique temporelle
Phase 3 : Choisir les types de déplacement par entité	
Identifier les directions d'accessibilité	Polyèdre caractéristique
Problèmes de visibilité	Sphère de Gauss
Définition du type de mouvement par entité	Paraxial/positionnement/fixe/contournage/demi-axe
Phase 4 : Choisir l'architecture de la machine	
Estimer des temps de déplacement et opératoires	Calcul de la durée de coupe, chronométrage
Proposer l'architecture	Logique temporelle, réseau de Pétri
Détermination de configuration	Méthode d'Helgeson et Birnie, simulation de flux
Phase 5 : Choisir les équipements	
Choix d'équipements de la partie opérative	Base de données équipements
Choix des actionneurs et de la partie commande	Base de données, technoguide (ADEPA, 1989)

Tableau 1.2 (Suite) – Démarche de conception d'un système de fabrication.

Composantes de la démarche	Outils et méthodes
Évaluer les coûts d'investissement	
Estimer les coûts de production	
Comparaison des solutions techniques possibles	Méthodes ADEQUA
Phase 6 : Estimer la qualité des pièces obtenues (précisions, etc.)	
Prise en compte de la géométrie réelle des machines,	Torseur des petits déplacements, simulation numérique
Prise en compte des défauts de mise en position	Torseur des petits déplacements, simulation numérique
Contrôler les accessibilités	Simulation numérique

Afin de répondre simultanément aux exigences de conception et de fabrication, remarquons que l'utilisation du concept d'entité constitue un lien fort entre la définition de la pièce et la conception du système de production associé. Ce concept, initié en France par le groupe GAMA (GAMA, 1990 et 1999, Tollenaere 1998), permet la formalisation de l'expertise, la capitalisation du savoir-faire, et de disposer très tôt, en phase de conception, d'informations liées aux activités de réalisation. D'une façon générale, l'entité est un groupement sémantique (atome de modélisation), caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisé pour décrire un objet indécomposable utilisé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et à l'utilisation des produits et des systèmes de production. La comparaison (tableau 1.3) entre les architectures de lignes pressenties pour assurer un compromis satisfaisant productivité/flexibilité/coût :

- ligne transfert linéaire, dite classique, composée de machines spéciales (solution A) ;
- ligne transfert linéaire composée de machines à éléments modulaires (solution B) ;
- ligne transfert linéaire composée de centres d'usinage CNC à grande vitesse (solution C) ;

peut être réalisée par la méthode d'analyse multicritères ADEQUA (aide à la décision de qualité).

Elle s'appuie sur la notion de critères destructif et sélectif. Le premier éliminera d'emblée une solution possible si cette dernière ne répond pas à l'exigence du critère. Le critère sélectif s'accompagne d'une pondération déterminée d'un commun accord au sein du groupe de travail.

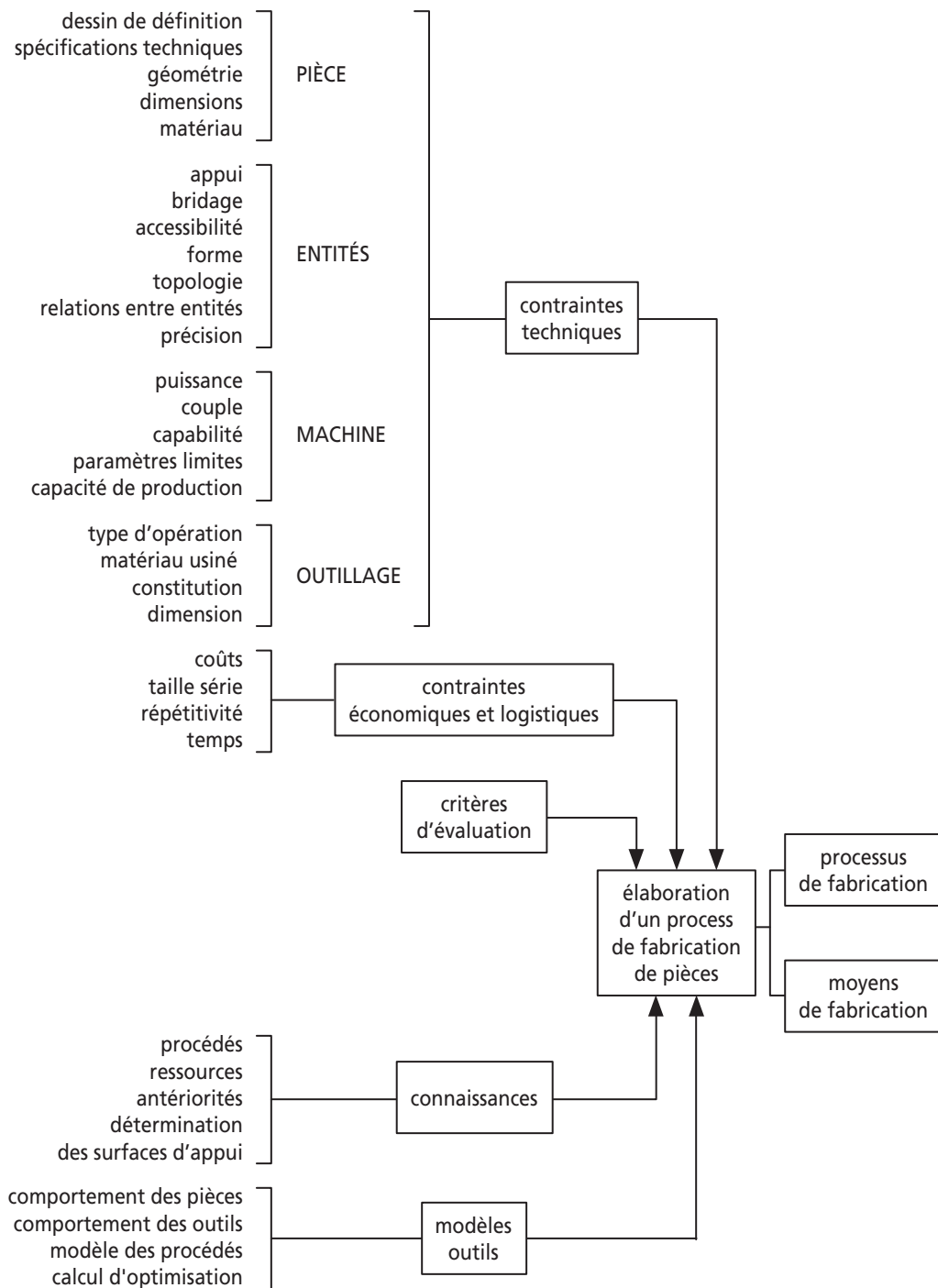


Figure 1.7 – Les éléments de base de la conception du système de fabrication.

Tableau 1.3 – Tests sur critères destructifs et sélectifs.

		Confrontation PO → PRO*					
Critères destructifs		A		B		C	
Coûts de production < 0,70 M€		oui		oui		oui	
Puissance broche ≥ 7,5 kW		oui		oui		oui	
Capacités dimensionnelles > 600 mm ³		oui		oui		oui	
		Confrontation PRO → PROU*					
Critères sélectifs	Pondération	N	NP	N	NP	N	NP
Flexibilité la plus grande possible	12	2	24	9	108	7	84
Vitesse et couple broche le plus ↗ possible	13	7	91	5	65	10	130
Nombre d'accessibilités le plus important possible	11	6	66	6	66	8	88
Rigidité la plus grande possible	9	9	81	7	63	7	63
Vitesse de déplacement des axes la plus ↗	12	7	84	7	84	10	120
Courses les plus grandes possibles	8	8	64	9	72	6	48
Précision de guidage la plus grande possible	9	7	63	7	63	7	63
Précision de positionnement des axes la plus grande possible	10	6	60	8	80	8	80
Fiabilité/robustesse la plus grande possible	9	8	72	6	54	7	63
Entretien le plus simple possible	7	6	42	9	63	6	42
Totaux		647		718		781	

* PO : possible. PRO : probable. PROU : prouvé.

1.2.4 Interaction gamme de fabrication/gestion de la production

Traditionnellement la gamme de fabrication en petites et moyennes séries est réalisée par le bureau des méthodes qui élabore l'ensemble des documents techniques pour l'atelier et la gamme opératoire (liste ordonnée des phases, ressources et temps associés) connaissant les capacités des moyens de production. La gamme opératoire est directement utilisée par la gestion de la production pour assurer la planification et les ordres de fabrication. Cependant le délai entre l'élaboration de la gamme et la réalisation de la série est plus ou moins long, les contraintes de production ne sont

pas directement prises en compte. La quantité de pièces peut être différente de celle initialement prévue, les ressources prévues peuvent être indisponibles ou saturées (postes goulets), les coûts d'utilisation des ressources sont variables. En général, le bureau des méthodes privilégie la machine la plus productive, qui n'est pas la moins chère, et qui risque de devenir un poste goulet, aussi doit-il proposer des variantes de gammes technologiquement possibles, la gestion de la production assurant le choix de la gamme opératoire en fonction de ses propres critères (coût, délai, charge), des coûts annexes (transferts, préparation des machines, réglages, montages pièces ou outillages...), et de la disponibilité des moyens de production lors du lancement. Afin d'obtenir les meilleures alternatives de gammes, par rapport à différents critères d'optimisation, une approche par programmation dynamique (Bellmann, 1957), utilisée en recherche opérationnelle, peut s'avérer utile.

À titre d'exemple les tableaux 1.4 et 1.5 fournissent pour une pièce simple, usinée en 8 opérations (perçage et fraisage), les temps de fabrication et les différentes gammes possibles triées suivant les critères (d'après Halevi, 1995) :

- coût de fabrication ;
- temps de fabrication ;
- coût d'investissement des ressources utilisées.

Ainsi pour une pièce unique ou une très petite série on choisira une machine unique pour réaliser toute la pièce : machine 3, durée : 11,1 min, coût : 15,54 €. Par contre si on veut privilégier les délais, on choisira l'alternative 5 : gamme : machines 1 et 6, durée : 5,87 min, coût : 20,4 €.

Tableau 1.4 – Données initiales : gamme, temps opératoires, antériorités.

Opération	Antériorité	Temps technologique réel (min)						Coûts de chaque opération (€)					
		M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6
10	0	0,40	0,45	1,35	-	1,69	1,24	1,60	1,35	1,89	-	1,69	2,48
20	10	0,32	0,37	0,88	-	1,22	0,54	1,28	1,11	1,23	-	1,22	1,08
30	20	1,21	1,26	1,77	-	-	1,36	4,84	3,78	2,48	-	-	2,72
40	20	0,70	0,75	1,26	-	-	0,85	2,80	2,25	1,76	-	-	1,70
50	10	0,29	0,34	1,14	-	2,58	4,70	1,16	1,02	1,60	-	2,58	9,40
60	10	0,94	0,99	1,50	1,50	1,84	1,09	3,76	2,97	2,10	1,50	1,84	2,18
70	50	0,62	0,67	1,18	-	1,52	1,62	2,48	2,01	1,65	-	1,52	3,24
80	50	1,46	1,51	2,02	-	2,36	1,09	5,84	4,53	2,83	-	2,36	2,18

Tableau 1.5 – Classement des alternatives de gamme suivant différents critères.

		Machine1	Machine2	Machine3	Machine4	Machine5	Machine6								
		Centre d'usinage	Fraiseuse CNC	Fraiseuse manuelle	Petite perceuse	Fraiseuse ancienne	Petite fraiseuse CNC								
coût machine (€)		400 000	300 000	70 000	5 000	20 000	10 000								
taux machine (€/min)		4	3	1,4	1	1	2								
Alternative	Coût total (€)	Durée totale (min)	Coût des ressources utilisées (€)												
Classement des gammes par rapport au coût de fabrication															
22	14,3	10,77	395 000	1,16	3,03	1,5	3,88	2	2	3	3	2	4	5	5
20	14,34	10,81	390 000	1,16	3,03		5,72		2	2	3	3	2	5	5
21	14,53	9,26	470 000	0,72	6,85			1,09	2	2	3	3	3	3	6
19	14,9	10,09	375 000	1,16	6,23	1,5			2	2	3	3	2	4	5
17	14,94	12,38	95 000		6,4	1,5	3,88		3	3	3	3	4	5	5
13	14,98	12,42	90 000		6,4		5,72		3	3	3	3	5	5	5

Tableau 1.5 (Suite) – Classement des alternatives de gamme suivant différents critères.

Classement des gammes par rapport au temps de fabrication																
5	20,4	5,87	500 000	4,48					1,09	1	1	1	1	1	1	6
1	23,76	5,94	400 000	5,94						1	1	1	1	1	1	1
9	16,97	6,22	400 000		4,83				1,09	2	2	2	2	2	2	6
2	19,02	6,34	300 000		6,34					2	2	2	2	2	2	2
7	22,1	6,5	405 000	5			1,5			1	1	1	1	1	4	1
8	19,57	6,59	700 000	0,4	5,89					1	2	2	2	2	2	2
Classement des gammes par rapport au coût des ressources engagées																
3	15,54	11,1	70 000			11,1				3	3	3	3	3	3	3
13	14,98	12,42	90 000			6,4		5,72		3	3	3	3	3	5	5
17	14,94	12,38	95 000			6,4	1,5	3,88		3	3	3	3	3	4	5
4	24,98	12,49	100 000						12,49	6	6	6	6	6	6	6
15	24,9	13,5	105 000				1,5		11,4	6	6	6	6	6	4	6
16	16,09	13,34	120 000					9,99	2,75	5	6	6	6	5	5	5

2 • LE PROTOTYPAGE RAPIDE¹

2.1 Introduction

L'industrie doit aujourd'hui répondre de plus en plus vite aux demandes des consommateurs ; de plus les nouveaux produits sont très vite concurrencés, leur cycle de vie devient plus court.

Il faut donc réduire les temps de conception des produits nouveaux, par exemple certains constructeurs d'électroménager renouvellent leurs produits tous les 6 mois. Il est impératif de concevoir vite et bien du premier coup. Depuis l'introduction de l'informatique adaptée à la conception, la CAO, il est possible de dessiner, de simuler les nouveaux produits avec une rapidité et une précision toujours plus grandes. Depuis quelques années on parle de plus en plus de réduire le nombre de prototypes utilisés dans le cycle de conception. Ces prototypes servent à valider les choix de conception ou à vérifier le bien-fondé des simulations ou des calculs de résistance par exemple.

Des grands groupes industriels cherchent à tendre vers le zéro prototype : après l'étude informatique, on passe directement à l'industrialisation. Est-ce une utopie ? Les raisons qui ont imposé ces choix sont surtout d'ordre économique, la réalisation d'un prototype coûtant beaucoup d'argent tant en matériel qu'en temps de réalisation.

Quelles sont alors les solutions pour réduire le temps d'étude, de pré-industrialisation, et d'industrialisation ? Il existe plusieurs voies :

- être capable de réaliser un maximum de validations avant la réalisation du prototype, c'est-à-dire reculer sa réalisation (un projet, un prototype, une série...) ;
- être capable de réaliser des prototypes rapidement ;
- adapter la fabrication du prototype à la validation recherchée (formelle, structurale, dimensionnelle, faisabilité...) ;
- être capable de réaliser des microséries avec des moyens rapides et flexibles.

Il existe pour chacune de ces voies des solutions qui se mettent en place petit à petit dans l'industrie. Le point commun de tous les procédés est le modèle numérique au travers de l'outil informatique.

1. Par Jean-François Guénal.

2.1.1 Du plan papier au modèle virtuel

L'ensemble des maillons du prototypage est constitué par tous les outils et techniques qui contribuent au raccourcissement du temps de fabrication du prototype et à la réduction des coûts de développement : CAO, *reverse engineering*, UGV...

Depuis les premières théories apparues vers la fin des années 1960, jusqu'à aujourd'hui, la conception assistée par ordinateur, a fait des progrès considérables. En 1970, les outils informatiques permettaient de « coller » un modèle mathématique sur une surface assez simple avec une précision moyenne.

En 1997, il est possible de créer un modèle virtuel très précis par rapport au modèle réel (figure 2.1). Ce modèle est un volume, qui peut être utilisé dans de nombreux calculs de simulation (résistance des matériaux, écoulement de matière, détermination de paramètres mécaniques, etc.).

La production de plans n'est plus une finalité mais une opération accessoire car en aval le modèle numérique peut continuer à être exploité.

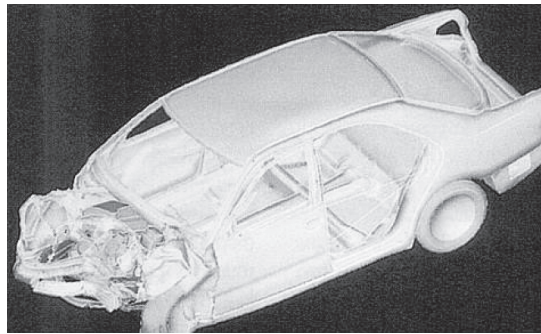


Figure 2.1 –Simulation d'un accident (doc. Mercedes Benz).

2.1.2 Du modèle virtuel au prototype

Après la CAO, la FAO permet d'exploiter les données numériques du modèle virtuel, pour réaliser la pièce. L'informatique a remplacé le plan et l'usinage traditionnel pour substituer des données numériques et des machines à commande numérique. Depuis 15 ans, les machines traditionnelles, numériques ou pas, sont concurrencées par des nouveaux procédés plus rapides et plus souples (figure 2.2).

Ces nouveaux processus sont rendus plus rapides par l'automatisation ou la suppression des étapes intermédiaires entre le plan et la pièce prototype.

2.1.3 Du prototype à la série

La rapidité et la précision des nouveaux procédés de prototypage rapide permettent d'envisager la réalisation de miniséries. Le prototype est transformé en une série de prototypes.

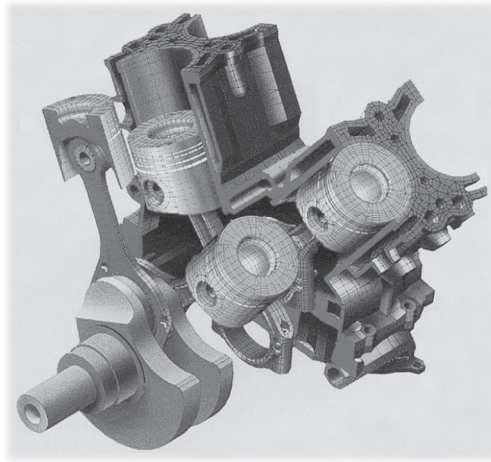


Figure 2.2 – Prototype (doc. Perkins).

Les constructeurs automobiles investissent dans des microchaînes de production pour valider par la suite les processus définitifs de réalisation. L'informatique est bien sûr un outil aujourd'hui irremplaçable pour la simulation de processus complexes de fabrication (figure 2.3).



Figure 2.3 – Simulation de processus.

2.2 Qu'est-ce qu'un prototype ?

2.2.1 Définition

« Modèle original ou premier exemplaire construit d'un ensemble mécanique, d'un appareil, d'une machine, destiné à en expérimenter les qualités en vue de la construction en série. » Cette définition, tirée du Larousse, permet de saisir le sens global du terme, mais de manière plus précise, l'industrie utilise des prototypes qui ne sont pas forcément toujours et seulement le premier exemplaire d'une série.

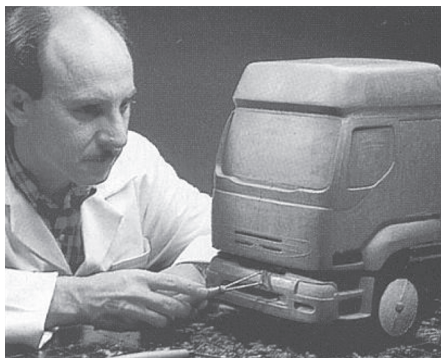
2.2.2 Classement des prototypes

■ Le prototype formel

On parle plutôt de maquette, laquelle est destinée à vérifier le volume, les formes et l'équilibre d'un dessin qui n'est qu'une représentation plane. La maquette est réalisée à un facteur d'échelle qui n'est pas obligatoirement la dimension réelle (figure 2.4).

Dans de nombreux domaines surtout liés au design, elle est primordiale et loin de disparaître. L'automobile, l'électroménager, toutes les industries de l'objet travaillent avec la maquette, qui sert d'ailleurs de base pour la numérisation, c'est-à-dire l'exploitation informatique. C'est le relevé de points.

Il faut noter que la maquette est toujours réalisée avec des matières malléables (plâtre, pâte à modeler, résine spéciale...).



(a)



(b)

Figure 2.4 – (a) Exécution de la maquette et (b) mesure tridimensionnelle des points.

■ Le prototype dimensionnel

Ce prototype est utilisé pour vérifier si les dimensions de la pièce sont compatibles avec son montage dans l'environnement du système. Cette application est en voie de disparition car la CAO est capable aujourd'hui de traiter l'implantation complète de mécanismes. Le prototype dimensionnel peut devenir un modèle pour la réalisation de pièces de fonderie. Le modèle est souvent réalisé en résine ou en bois.

■ Le prototype d'essai

Il est destiné à être testé, notamment du point de vue résistance. Il est donc réalisé dans la matière définitive du système, en respectant les cotes du bureau d'étude.

■ Le prototype fonctionnel

Il a pour but de vérifier le bon fonctionnement d'un système. Le terme prototype est trop restrictif car en fait il s'agit d'un système prototype comportant de nombreuses pièces. En général, les matières sont celles envisagées en série, les moyens de production sont spécifiques au prototype.

2.2.3 Conclusions

Tous ces prototypes peuvent être utilisés pendant l'étude d'un projet. Ils se complètent et se suivent dans l'ordre chronologique de l'étude.

Ils font tous appel à des procédés d'obtention assez éloignés des moyens utilisés pour la série.

2.3 Moyens conventionnels de prototypage

2.3.1 Les outils traditionnels

Ces outils ne font pas appel à l'informatisation, mais à un personnel très qualifié et des moyens d'usinages traditionnels : fraisage, tournage, perçage, soudage, ajustage... Ces moyens sont encore employés pour la réalisation de moules de pièces injectées de formes simples. Les temps d'exécution sont longs, il faut compter en semaines en général. Il faut noter que les machines traditionnelles sont souvent complétées par des MOCN (machine-outil à commande numérique).

2.3.2 CFAO + MOCN = gain de temps

Lorsque le modèle numérique existe, on fait appel à la CFAO pour le traiter et extraire des parcours d'outils qui sont ensuite exécutés sur des machines à commande numérique (figure 2.5).

Il existe un marché de machines spécifiques pour cette application, elles sont caractérisées par :

- un nombre d'axes pilotés simultanément : après avoir commencé par des machines 3 axes, extrapolées de machines de production, le nombre d'axes augmente, aujourd'hui, il n'est pas rare de trouver des machines 5 axes. Une machine 5 axes permet de maîtriser le positionnement de la broche par rapport à la normale à la surface travaillée ;
- les courses de ces machines sont importantes (2 m en moyenne sur les axes horizontaux), leur conception spécifique (nombre d'axes, courses, broches) est adaptée à de grandes vitesses de déplacement avec des efforts de coupe limités, les vitesses d'avance atteignent 8 000 mm/min voire plus ;
- une broche de 2 à 15 kW avec des vitesses de rotation très importantes, 20 000 à 50 000 tr/min ;

- un calculateur rapide et puissant, capable de traiter un grand nombre de points avec un asservissement précis en vitesse et déplacement. En effet, en phase de finition, on impose un critère de hauteur de crête entre les traces de passage de l'outil. Il est courant de pratiquer une hauteur maximale de 0,01 mm.

■ Les machines 5 axes à structure portique

Ces machines possèdent en général de grandes courses avec une rigidité moyenne (figure 2.5).

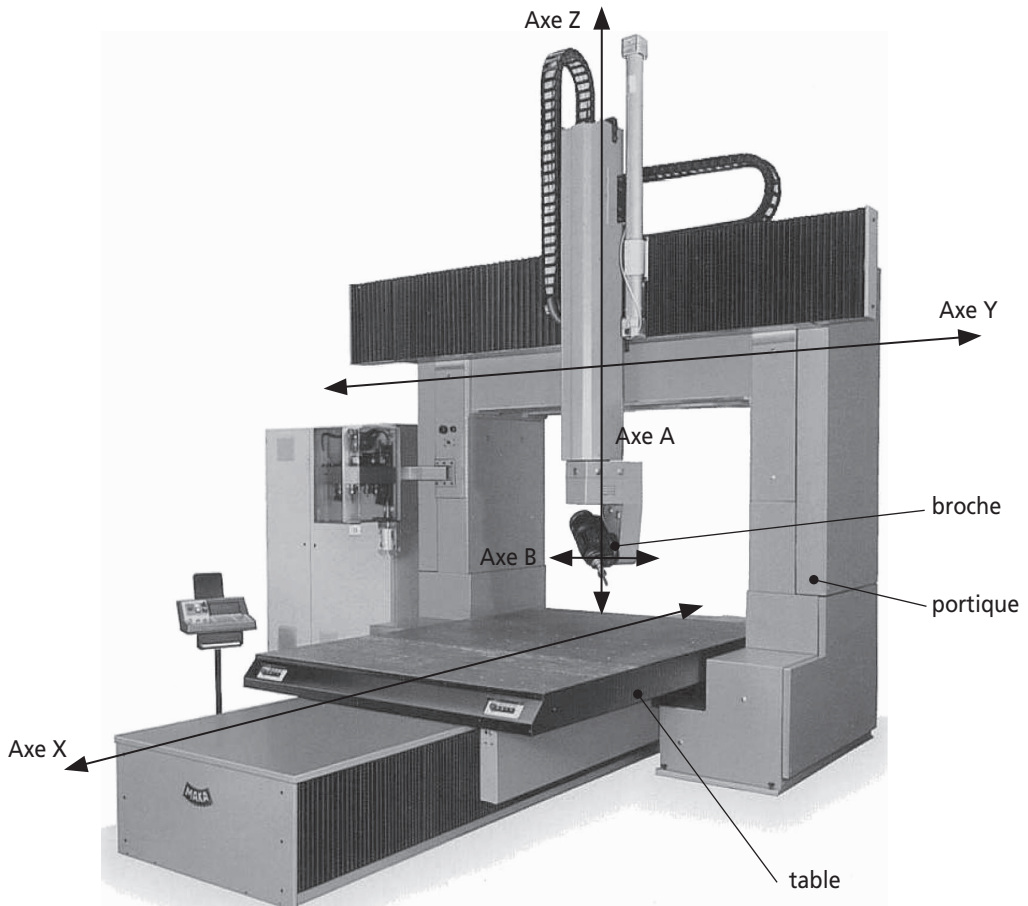


Figure 2.5 – Machine 5 axes à structure portique.

■ Les machines avec plateau rotatif

Ces machines reposent sur une structure plus conventionnelle. Les axes supplémentaires sont obtenus par la combinaison de deux rotations sur le plateau, et une sur la broche (figure 2.7).

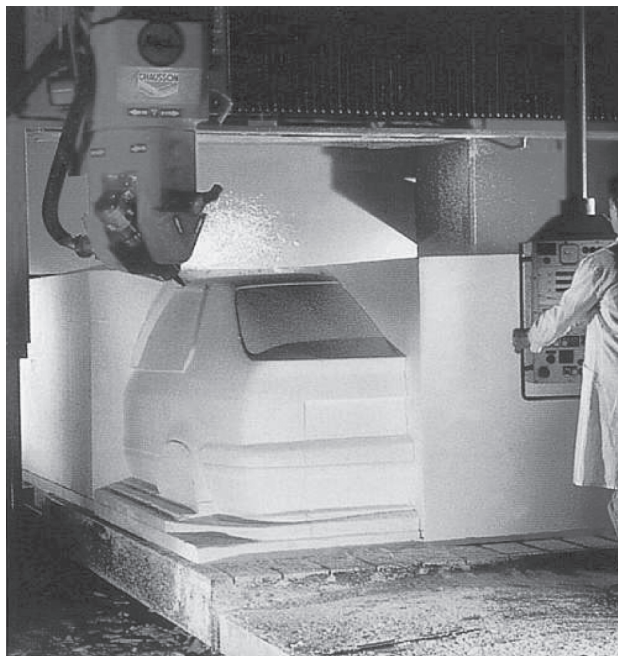


Figure 2.6 – Réalisation chez Renault d'une maquette échelle 1 de R19. Cette maquette, exécutée rapidement comparativement à une maquette plâtre, permet de valider le style définitif. Les retouches sont rapides à réaliser.

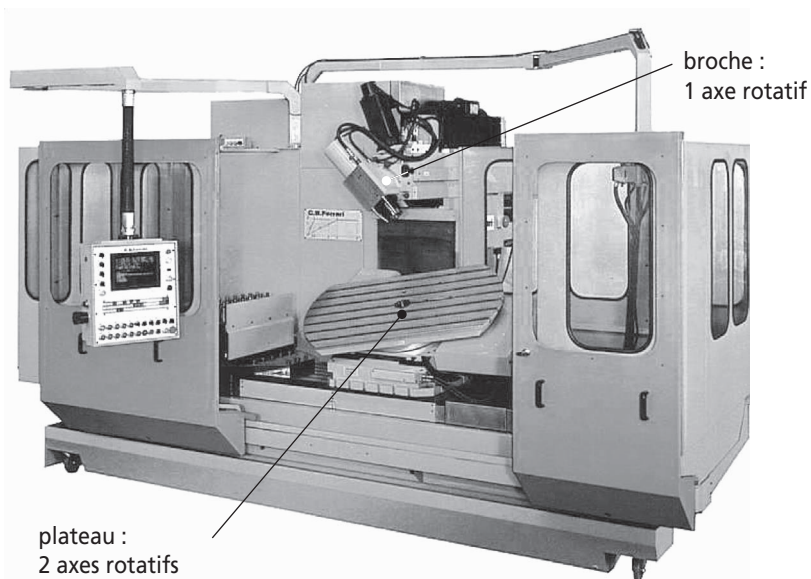


Figure 2.7 – Centre de fraisage 6 axes de structure RRTTTR.

■ Les machines non conventionnelles à morphologie parallèle

La conception de ces machines très récentes élimine les axes en translation pour les remplacer par 6 axes numériques montés sur rotule et reliés au berceau porteur de la broche. Contrairement aux machines conventionnelles qui utilisent une cinématique avec des liaisons en série, les machines non conventionnelles ont une morphologie avec des liaisons en parallèle. L'allongement ou la réduction de la longueur de ces axes permet d'obtenir un déplacement de la broche (figure 2.8).

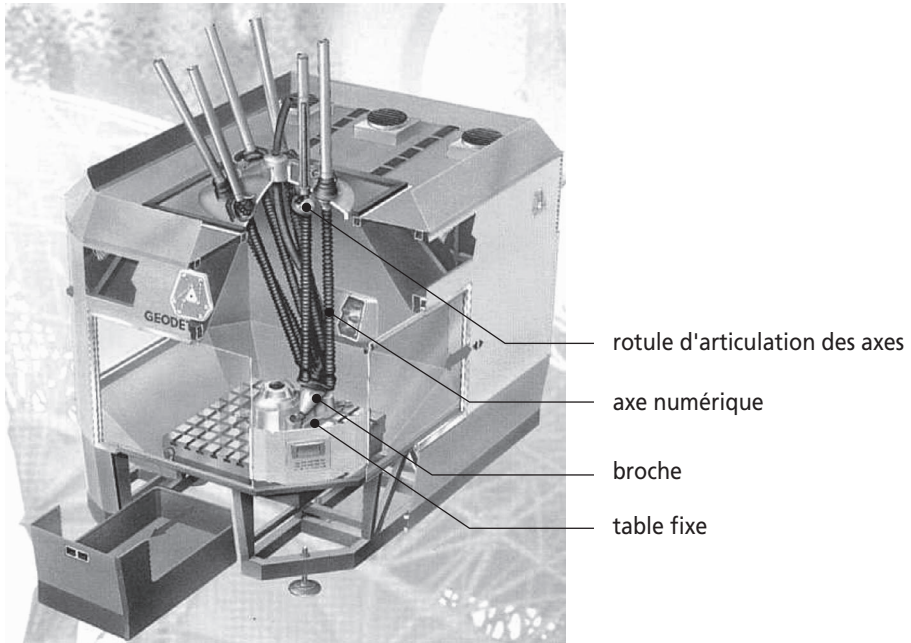


Figure 2.8 – Machine hexapode.

2.3.3 Conclusions

Tous ces procédés ont pour point commun l'enlèvement de matière. On part d'un bloc dont la taille est adaptée au volume de la maquette pour ensuite, par enlèvement de matière à l'aide d'outils coupants, obtenir la pièce finale.

Le ratio volume copeau sur volume pièce finale est toujours en faveur du premier dans des proportions importantes. Cela s'ajoute aux coûts de main-d'œuvre qualifiée, ainsi qu'à ceux des machines spécialisées qui restent importants.

Les procédés les plus récents mettent en œuvre un principe différent : la distribution de matière.

2.4 Procédés de distribution de matière ou prototypage rapide

Seul le terme de prototypage rapide est employé pour caractériser ces procédés.

2.4.1 Principe

Au lieu de retirer de la matière, on va la distribuer là où elle est utile, c'est-à-dire dans la pièce. Il faut tout de suite noter que ces procédés ne fonctionnent qu'en relation avec la CAO, et donc avec un modèle numérique.

Ce modèle est découpé virtuellement en strates de très faibles épaisseurs ; on peut résumer cela en parlant d'intersection entre un plan (la strate) et un volume. L'intersection des deux détermine les zones où il faut distribuer la matière.

2.4.2 Points clés de la stratification

■ Génération de couches

Il faut séparer les procédés utilisant des couches préfabriquées (feuille plastique ou papier, fil) des procédés utilisant des résines liquides ou des poudres. Dans le second cas, l'épaisseur des couches est plus difficile à réaliser, or elle conditionne pour une grande part la précision de la pièce. Le savoir des fabricants de machines réside, entre autres, dans les techniques de réalisation de couches.

■ Surplus ou manque de matière

L'assemblage des tranches composant le volume génère une erreur de forme qui dépend de la variation de la géométrie dans l'axe d'assemblage des couches.

Il importe de bien orienter la pièce par rapport à l'axe de stratification, pour réduire les surplus de matière qui doivent être éliminés par la suite (figure 2.9).

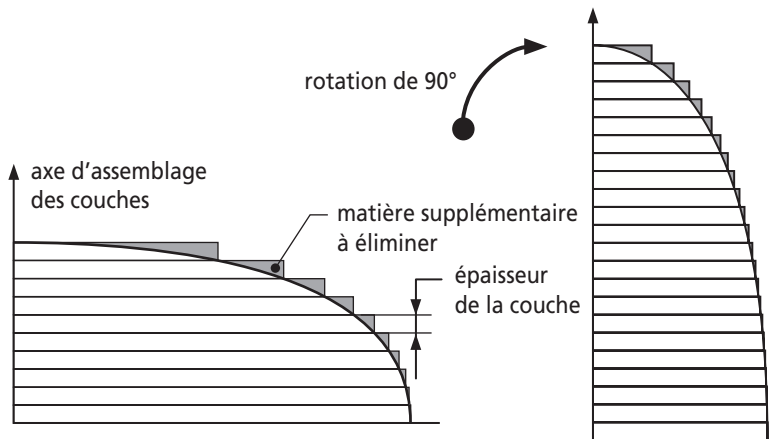


Figure 2.9 – Surplus de matière.

■ Appuis temporaires

Certains procédés distribuent la matière là où elle est nécessaire pour composer le volume. En faisant une analogie avec la construction d'un bâtiment, on commence en prototypage par les couches en contact avec le plateau qui correspondent aux fondations, puis les murs sont montés. Reste le plancher qui doit être étayé pendant sa fabrication, le prototypage par couche reprend ce principe en ajoutant de la matière pour soutenir les formes en porte-à-faux ; ce sont les supports.

Les fabricants de machines ont développé des stratégies aidant à déterminer le nombre et la disposition des appuis pour éviter l'effondrement de la pièce. Dans ce cas, en plus de la pièce, certains composants de la machine peuvent être détériorés. Lorsque la pièce est terminée, ces appuis sont éliminés par voie chimique ou de façon manuelle selon les procédés.

2.4.3 Quelques chiffres

Le prototypage rapide représentait en 1997 environ 2 250 machines, dont 52 % aux États-Unis, 18,6 % au Japon, devant l'Allemagne, la France, la Grande-Bretagne, l'Italie et la Corée. En 1996, il a été vendu 723 unités nouvelles, soit 46 % d'augmentation par rapport à 1995.

D'un point de vue matériel et services liés, on estime la valeur du marché actuel à 421 millions de dollars, à comparer aux 295 millions de 1995. Le deuxième marché, c'est-à-dire les outillages, les pièces dupliquées en plastique, les pièces de fonderie, a augmenté de 63 % pour atteindre 286 millions de dollars. Le marché est estimé à 1,1 milliard de dollars en 1999.

Il faut bien comprendre que ce marché suit un taux de croissance moyen de 50 % par an, les machines se démocratisent grâce à l'apparition de nouveaux procédés moins coûteux, même si les performances sont diminuées. Des études montrent qu'avec l'arrivée de machines vendues à environ 20 000 €, 50 % des bureaux d'étude seront équipés.

2.4.4 Les techniques

Si ces procédés reposent sur plusieurs technologies différentes, elles ont toutes un point en commun, un principe de base, construire un volume complexe à partir de couches ou de strates, superposées les unes sur les autres.

La plus ancienne est la stéréolithographie : un faisceau laser polymérise une résine photopolymérisable par balayage, couche après couche.

Concurrent direct, on remplace le laser par une lumière ultraviolette qui polymérise la résine à travers un masque dont le dessin est exécuté automatiquement.

Ce procédé toujours très prisé est concurrencé par le procédé LOM : un laser découpe dans une feuille de papier autocollant la forme de la couche. La superposition de ces couches forme la pièce finale.

Toujours à partir d'un laser, on trouve le procédé de polymérisation de sable + liant photopolymérisable. Ce procédé permet la réalisation de moules de fonderie.

En augmentant la puissance du laser (500 W minimum), on pratique le frittage : le laser parcourt une poudre métallique étalée en fine couche, en fonction du dessin

de la pièce. La chaleur très localisée du laser provoque une fusion de la poudre qui forme après refroidissement un agglomérat solide.

Les procédés les plus récents font appel à un dépôt de matière plastique grâce à une tête d'impression équipée de buses très fines. Cette technique, s'inspirant de la technologie d'impression du jet d'encre a donné le nom d'imprimantes 3D à ces machines.

Dernier procédé en lice, développé par le MIT, on construit un modèle à partir de poudre, et la pièce est transformée en solide grâce à l'application d'un adhésif. L'intérêt majeur de ce procédé est sa rapidité jusqu'à 20 fois supérieure par rapport à celles des autres procédés.

■ Stéréolithographie par laser

□ Principe

Il faut utiliser une résine photopolymérisable qui, sous l'effet de la lumière du laser, va se durcir de manière irréversible. Le faisceau laser se focalise sur un rayon faible (0,2 mm). On travaille sur des couches successives dont l'épaisseur varie de 0,05 à 0,2 mm (figure 2.10).

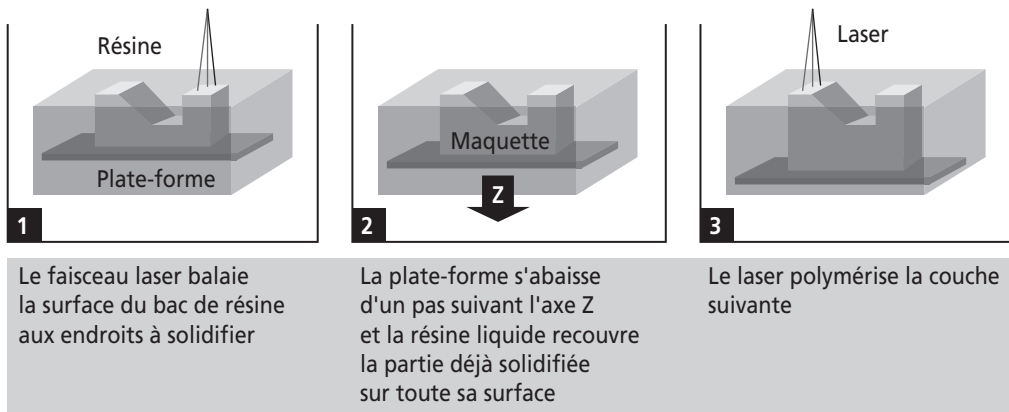


Figure 2.10 – Principe de la stéréolithographie par laser.

□ Réalisation

La pièce est conçue en CAO sous forme d'un modèle volumique. Ce type de modélisation est important car il permet de déterminer où se trouve la matière. Il faut ensuite traiter le modèle numérique pour déterminer les différents parcours du laser.

On recherche l'intersection entre un plan dont l'altitude varie et le volume. L'altitude varie de manière incrémentale, on obtient des tranches qui sont en fait le parcours du laser à une position du plan donnée. L'incrément est compris entre 0,05 et 0,2 mm. Les parcours du faisceau sont exécutés sur la machine. Ces zones sont polymérisées, donc durcies.

□ Applications

Elles sont multiples et couvrent tous les secteurs industriels, aéronautique, automobile, équipements domestiques.

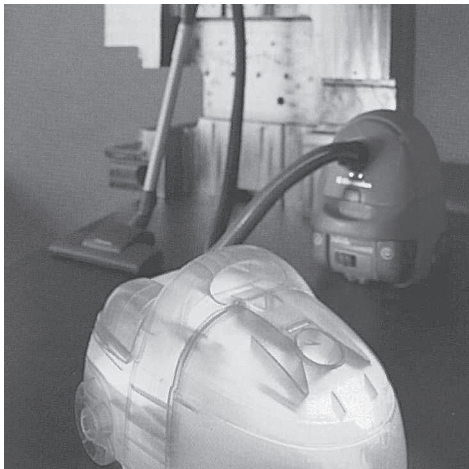


Figure 2.11 – Pièce réalisée sur machine 3D systems : prototype de forme de la carrosserie d'un aspirateur.

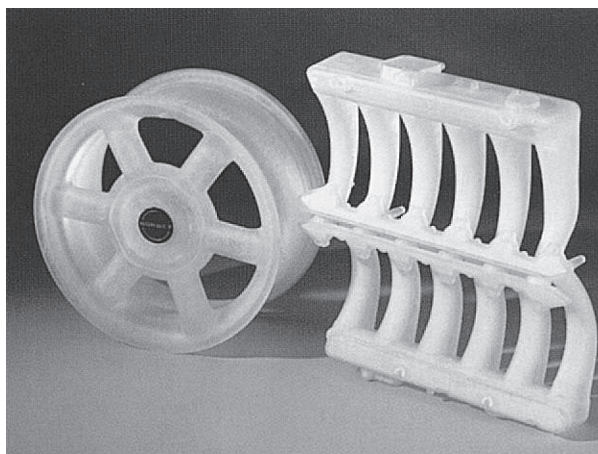


Figure 2.12 – Prototype de jante en alliage d'aluminium et conduit d'admission moteur pour BMW.

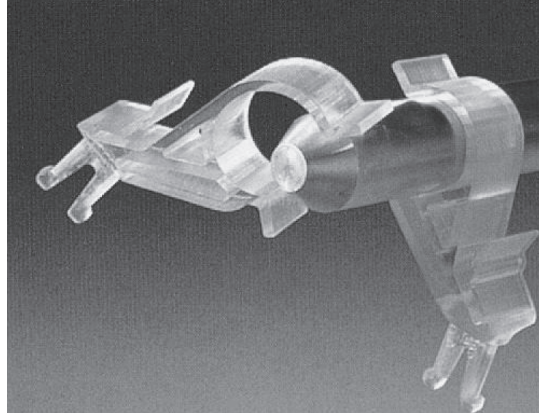


Figure 2.13 – Pièces de précision pour réalisation en matière plastique.

■ Stéréolithographie par masquage (Cubital)

□ Principe

On utilise toujours une résine photopolymérisable, mais le laser est remplacé par une lumière ultraviolette qui va éclairer la résine au travers d'un masque dont le motif est fonction de la forme à obtenir.

Comme dans le principe précédent, on travaille par couches successives, il y a donc autant de masques que de couches. En réalité les masques sont des plaques de verres traitées sur lesquelles on dépose un toner opaque (figure 2.14).

On peut considérer qu'il y a deux machines en une :

- une pour la réalisation des masques ;
- l'autre pour la polymérisation.

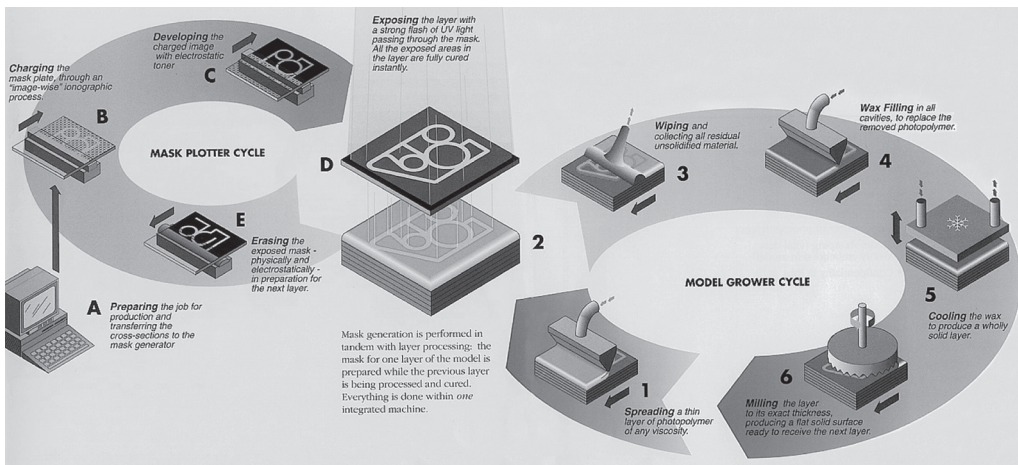


Figure 2.14 – Principe de la stéréolithographie par masquage.

□ Applications

La précision du procédé permet de réaliser des mécanismes complexes avec intégration de liaisons (figure 2.15).

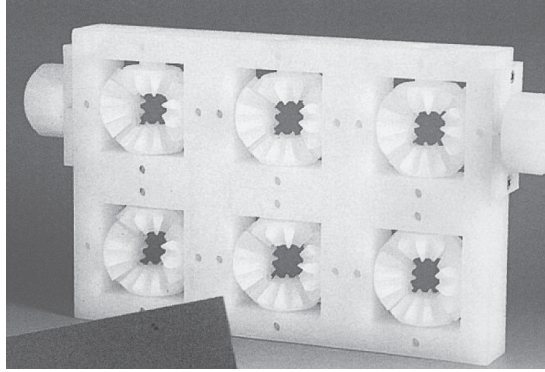


Figure 2.15 – Réalisation d'un prototype de compteur d'eau.

■ Laser + poudres

□ Poudres plastiques

La poudre plastique est déposée en une fine couche par un distributeur (figure 2.16). Le laser dont le faisceau est dirigé par un miroir se déplace pour fondre et donc lier la poudre de plastique. Une fois la couche terminée, le plateau descend d'une épaisseur, et le cycle recommence.

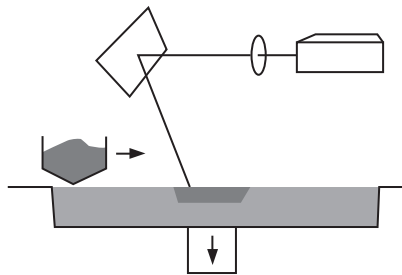


Figure 2.16 – Principe du procédé laser + poudres.

Les matières utilisées sont principalement le polystyrène et le polyamide (Nylon). Dans les exemples de prototypes réalisés, il faut dégager la poudre non durcie pour obtenir la pièce (figure 2.17).

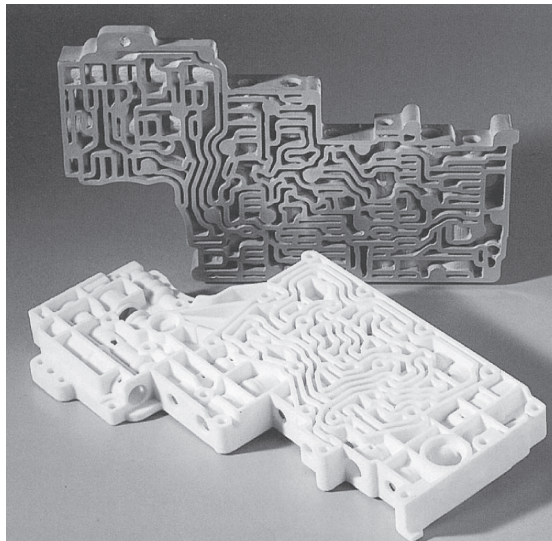


Figure 2.17 – Circuit hydraulique de commande de boîte de vitesses automatique pour automobile.

☐ Frittage laser

La poudre plastique est remplacée par de la poudre métallique, alliage à base d'aluminium, de cuivre ou d'acier (figure 2.18).

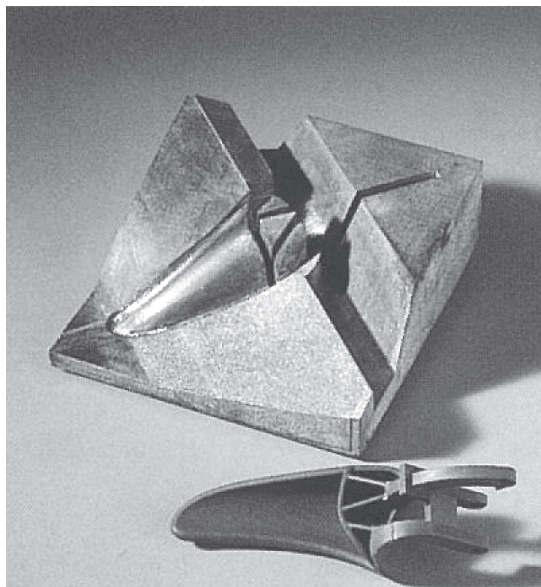


Figure 2.18 – Poignée et son moule (doc. EOS).